مجله به‌زراعی نهال و بذر
جلد ۲-۳۳، شماره ۲، سال ۱۳۹۶

واسنجی و ارزیابی مدل IXIM برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ در شرایط آب و هوایی گرگان

Calibration and Evaluation of the IXIM Model for Simulation of Growth and Yield of Maize (SC 704) in Gorgan Climatical Conditions

محمدتقی فیض‌بخش[۱]، بهنام کامکار[۲]، حسن مختارپور[۳]
و محمد اسماعیل اسدی[۴]

۱ و ۳- استادیار، بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران
۲- دانشیار، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۴- استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گرگان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۹

چکیده

فیض‌بخش ، م. ت.، کامکار ، ب.، مختارپور، ح. و اسماعیل اسدی ، م. ا. ۱۳۹۶. واسنجی و ارزیابی مدل IXIM برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت (سینگل‌کراس ۷۰۴) در شرایط آب و هوایی گرگان. **مجله به‌زراعی نهال و بذر ۲-۳۳: ۲۳۰- ۲۰۳.**

استفاده از مدل‌سازی در تحقیقات و مدیریت مزرعه روز به روز در حال توسعه است. IXIM مدل جدیدی است و ارزیابی آن در سراسر جهان به‌وسیله محققان آغاز شده است. به منظور واسنجی و ارزیابی مدل IXIM برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت در شرایط آب و هوایی گرگان دو آزمایش مزرعه‌ای (هرکدام در دو سال) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان انجام شد. با استفاده از تیمارهای آبیاری مطلوب و بدون تنش خشکی در سال ۱۳۹۱ (سه تیمار) و دو تیمار از آزمایش دوم در سال ۱۳۸۶، مدل IXIM واسنجی شد. ارزیابی مدل با استفاده از تیمارهای آزمایش تاریخ کاشت بهاره (۲۰۰۸)، آزمایش‌های تاریخ کاشت و کم‌آبیاری در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ انجام شد. نتایج ارزیابی نشان داد که این مدل مراحل فنولوژیکی (روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی) را در تاریخ کاشت‌های مختلف و رژیم‌های آبیاری متفاوت و بر اساس شاخص‌های آماری به خوبی پیش‌بینی می‌کند و بیشترین جذر میانگین مربعات خطا برای روز تا گرده‌افشانی از تاریخ کاشت پانزدهم تیرماه (به میزان ۲/۲۴ روز) به دست آمد، بنابراین این مدل می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مزرعه مورد استفاده قرار گیرد. نتایج ارزیابی مدل در تاریخ کاشت‌های بهاره (۱۳۸۷) و تابستانه (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲) نیز نشان داد که این مدل عملکرد ماده خشک و عملکرد دانه را با دقت خوبی شبیه‌سازی می‌کند. مدل روند کاهشی عملکرد ماده خشک و عملکرد دانه را در سطوح مختلف آبیاری (به جزء تنش کامل آبیاری) به خوبی شبیه‌سازی کرد و بر اساس شاخص‌های کارکرد مدل(RMSE، R^2, d و NRMSE) از دقت لازم برخوردار بود. این مدل در شبی‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ و میزان تبخیر و تعرق تحت تأثیر تیمارهای آبیاری دارای دقت خوبی نبود. با توجه به نتایج، از این مدل می‌توان در شبیه‌سازی مراحل رشد و نمو، عملکرد ماده خشک و عملکرد دانه ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ در تاریخ کاشت‌های مختلف و در رژیم‌های آبیاری متفاوت در شرایط آب و هوایی گرگان بهره برد.

واژه‌های کلیدی: ذرت، مدل‌سازی، تاریخ کاشت، کم‌آبیاری، عملکرد دانه.

نویسنده مسئول: feyz_54@yahoo.com تلفن: ۰۱۷۳۲۱۷۰۰۶۹

مقدمه

مدل‌های شبیه‌سازی از جمله رهیافت‌هایی هستند که با اهداف مختلفی نظیر انتخاب گیاه و رقم مناسب، تعیین بهترین گزینه‌های مدیریت زراعی، برآورد پتانسیل تولید مناطق، تعیین خط و مشی‌های به‌نژادی ارقام، انتقال فناوری، پهنه‌بندی اکولوژیک، پیش‌بینی اثرات دما، تغییر اقلیم و تجزیه و تحلیل خلاء ساخته و استفاده شده‌اند (Kamkar *et al.,* 2008؛ Soltani *et al.,* 2008؛ Kamkar *et al.,* 2007). از مهم‌ترین این گروه‌ها می‌توان به گروه‌های DSAAT، APSIM، CROPSyst، EPIC و ALMANAC اشاره کرد (Willmott, 1982؛ Soltani *et al.*, 2008).

سیستم حمایت تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری کشاورزی (DSSAT) یکی از معروف‌ترین و پراستفاده‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی در گیاهان زراعی است (Mahroo- Kashani *et al.,* 2008؛ Jones *et al.,* 2003؛ Gheysari, 2009) بسته نرم‌افزاری DSSAT حاصل تلاش گروه قابل‌توجهی از مدل‌سازان به‌ویژه از دانشگاه فلوریدا، دانشگاه جورجیا، و دانشگاه هاوایی است (Soltani *et al.,* 2008). بسته نرم‌افزاری DSSAT به منظور کامل کردن دانش، درباره خاک، اقلیم، گیاهان و مدیریت برای تصمیم گیری بهتر و انتقال فناوری تولید از یک نقطه به نقاط دیگر با شرایط مختلف خاک و اقلیم توسعه یافته است. این بسته نرم‌افزاری مجموعه‌ای از برنامه‌های مستقل است که با یک‌دیگر به‌کار برده می‌شوند (Gheysari, 2009). و برای ۲۸ محصول زراعی عمده قابل استفاده است (Mokhtarpour, 2011).

توصیف مدل IXIM

IXIM نام ذرت در زبان مایان است و یک مدل شبیه‌سازی جدید ذرت است که در جدیدترین نرم‌افزار، DSSAT version 4.5 قرار داده شده است (Anonymous, 2010؛ Lizaso *et al.,* 2008). مدل IXIM تغییر یافته (Crop Environmet DSSAT- Maize Resource Synthesis- Maize) است و شامل تعدادی از مدل‌های جدید و توسعه یافته است. این مدل تولید روزانه محصول و میزان تنفس را در پاسخ به زاویه نوردریافتی، سن برگ و دمای هوا شبیه‌سازی می‌کند و از نظر تئوری بر محدودیت‌های روش کارآیی مصرف نور غلبه می‌کند (Lizaso *et al.,* 2055a,b). مدل IXIM همان حداقل داده‌های مورد نیاز مدل‌های DSSAT را نیاز دارد، بنابراین همانند بقیه مدل‌های DSSAT فقط به تابش روزانه خورشیدی (مگاژول در مترمربع)، حداقل و حداکثر دما (سانتی‌گراد) و میزان بارندگی (میلی‌متر) نیاز دارد.

اختلافاتی بین مدل CERES-Maize و IXIM وجود دارد. تفاوت اصلی بین آن‌ها در

روش‌های مختلف محاسبه رشد روزانه محصول، توسعه و زوال برگ و تعداد دانه در بوته است. با توجه با آشنایی اکثر محققان مدل‌سازی با مدل CERES-Maize و شباهت‌های بین مدل CERES-Maizeو IXIM اطلاعات بیشتر در مورد اختلافات بین دو مدل در ادامه آورده شده است.

اختلافات بین مدل CERES-Maize و IXIM

الف- محاسبه سرعت رشد روزانه گیاه: بر اساس مطالعات لومیس و آمتور (Loomis and Amthor, 1999) روش کارآیی مصرف نور با روش فتوسنتز- تنفس در مدل IXIM برای محاسبه سرعت رشد روزانه محصول جایگزین شد. در این مدل سرعت رشد محصول به عنوان نتیجه نهایی جذب خالص و تنفس محاسبه می‌شود (Lizaso *et al.,* 2005a,b).

ب- محاسبه سطح برگ: در مدل IXIM، روش جدیدی برای رشد و توسعه برگ قرار داده شده است که برای رقم خاص، رشد و زوال برگ‌ها را به عنوان تابعی از فنولوژی شبیه‌سازی می‌کند. مدل جدید یک چارچوب پویا را برای پیش‌بینی سطح برگ و تطبیق ضرایب ژنتیکی و یا رقم ویژه در پاسخ به دما، رقابت بین گیاه و تنش آب فراهم می‌کند (Lizaso *et al.,* 2005a). برای محاسبه توسعه و زوال برگ در مدل IXIM به دو ضریب ژنتیکی یعنی سطح بزرگ‌ترین برگ (سانتی‌مترمربع) و دوام برگی که بیشترین طول عمر را دارد (درجه روز رشد بر اساس دای پایه ۸ درجه سانتی‌گراد) نیاز است (Lizaso *et al.,* 2003a,b).

ج- تعداد دانه در بوته: در مدل IXIM و بر اساس مطالعات لیزاسو و همکاران (Lizaso *et al.*, 2001) متوسط سرعت رشد روزانه گیاه در ۲۵۰ درجه روز رشد قبل از بلال‌دهی تا ۱۰۰ درجه روز رشد بعد از بلال‌دهی برای محاسبه تعداد دانه در بوته مورد استفاده قرار می‌گیرد در صورتی که تنش شدید وجود داشته باشد تعداد دانه در بلال کاهش می‌یابد. ولی اگر تنشی وجود نداشته باشد تعداد دانه در هر بوته مساوی یا بیشتر از ۱۵ درصد G2 خواهد بود و در صورتی که تنش وجود داشته باشد تعداد بلال در مترمربع کمتر از تعداد بوته در متر مربع محاسبه خواهد شد و تعداد دانه کمتر از ۱۵ درصد G2 محاسبه می‌شود و تعداد دانه در مترمربع از ضرب تعداد دانه در بلال و تراکم بوته در مترمربع محاسبه می‌شود (Lizaso *et al.,* 2008).

کاربردهای مدل IXIM

دقت مدل IXIM به وسیله لیزاسو و همکاران (Lizaso *et al.*, 2005) با استفاده از داده‌های مستقل و از مقالات مختلف در عرض‌های جغرافیایی وسیع (۴۵-۲۱ درجه شمالی) مورد ارزیابی قرار گرفت. همه آزمایش‌ها در شرایط بدون تنش آب و نیتروژن بودند و

آزمایش‌های انجام شده در اونتاریا (Rochette *et al.*, 1996)، مینیسوتا (Westigate *et al.*, 1997) و نبراسکا (Boedhram, 1998) انجام شده بودند. علاوه بر این، داده‌های حاصل از سه آزمایش انجام شده توسط محققان دیگر که در فلوریدا و هاوایی، که با نرم‌افزار DSSAT 3.5 منتشر شده، برای بررسی توانایی مدل مورد استفاده قرار گرفت. شاخص سطح برگ (LAI) و تجمع بیوماس در مراحل مختلف رشد شبیه‌سازی شده توسط مدل IXIM با شاخص سطح برگ و تجمع بیوماس مشاهده شده مقایسه شد. آن‌ها گزارش کردند که داده‌های شبیه‌سازی شده به داده‌های مشاهده شده بسیار نزدیک بود.

اخیراً مصرف آب به‌ویژه مصرف آب در سیستم آبیاری به‌وسیله کشاورزان یکی از مسائل مهمی است که زیاد به آن پرداخته می‌شود و کمبود آب کشاورزان را مجبور به کاربرد مدیریت کم‌آبیاری کرده است، اما ارتباط مستقیمی بین اثر کم‌آبیاری و تاریخ کاشت وجود دارد بنابراین ضرورت دارد اثر متقابل تاریخ کاشت ذرت در شرایط کم‌آبیاری با استفاده از مدل‌های گیاهی در مقیاس منطقه‌ای بررسی شوند. این مطالعه با هدف بررسی کارآیی و دقت شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد ذرت (هیبرید SC704) در تاریخ کاشت‌های متفاوت در شرایط کم‌آبیاری در گرگان با استفاده از مدل گیاهی IXIM از بسته نرم‌افزاری DSSAT انجام شد.

مواد و روش‌ها

مدل IXIM به اطلاعات ورودی مربوط به هوا، خاک، مدیریت زراعی و رقم زراعی نیاز دارد. قبل از اجرای مدل، این ورودی‌ها در اختیار مدل قرار می‌گیرند (Rochette *et al.*, 1996).

این اطلاعات به شرح زیر تهیه شدند:

الف) اطلاعات هواشناسی: داده‌های روزانه مربوط به دمای حداقل و حداکثر، تابش خورشیدی و مقدار بارندگی (اطلاعات هواشناسی برای ارزیابی مدل) از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی واقع در فرودگاه گرگان به فاصله ۲ کیلومتر از محل اجرای آزمایش تهیه شد.

ب) اطلاعات خاکشناسی: بافت خاک، ساختمان خاک، تعداد و عمق هر یک از لایه‌های خاک، وزن مخصوص ظاهری، عناصر غذایی و ظرفیت نگهداری، نقطه پژمردگی، عمق نفوذ ریشه، میزان هدایت الکتریکی و pH هر لایه قبل و حین اجرای آزمایش ثبت شد. در آزمایشگاه برای تعیین نقطه پژمردگی دایم، ظرفیت زراعی و نقطه اشباع از روش صفحه فشاری (Pressure plate)، بافت خاک به روش هیدرومتر و pH در گل اشباع تعیین شدند.

ج) مدیریت زراعی: نوع رقم و تیپ رشدی آن، تاریخ کاشت، عمق کاشت، فاصله خطوط، تراکم کاشت، تاریخ‌های آبیاری و مقدار آب

آبیاری.

د) رقم زراعی: شامل پارامترهای ژنتیکی مخصوص رقم است.

به منظور واسنجی و ارزیابی IXIM برای شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد ذرت (هیبرید SC704) از داده‌های دو آزمایش استفاده شد. این آزمایش‌ها در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان واقع در ۵ کیلومتری شمال گرگان با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی، با ارتفاع ۵ متر از سطح دریا اجرا شده بودند.

آزمایش اول به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در تابستان ۱۳۹۲ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی عبارت بودند از تاریخ کاشت در سه سطح (اول، پانزدهم و سی‌ام تیرماه) و تیمارهای آبیاری در چهار سطح (آبیاری مطلوب، زمانی که رطوبت خاک به میزان ۴۰ درصد از آب قابل استفاده (Maximum Allowable Depletion: MAD = %40) کاهش یافت، آبیاری زمانی که رطوبت خاک به میزان ۶۰ درصد از آب قابل استفاده (MAD = %40) کاهش یافت، آبیاری زمانی که رطوبت خاک به میزان ۸۰ درصد از آب قابل استفاده (MAD = %80) کاهش یافت و قطع کامل آبیاری بعد از مرحله سه برگی تا رسیدگی فیزیولوژیکی). برای تعیین مقدار آب مورد نیاز برای آبیاری ۲۴ ساعت پس از هر آبیاری، میزان رطوبت از طریق نمونه‌برداری از خاک (با استفاده از اوگر) در عمق توسعه ریشه تعیین شد و بلافاصله پس از رسیدن به ضریب‌های رطوبتی تعیین شده آبیاری انجام شد. مقدار آب آبیاری بر اساس درصد کاهش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه تا حد ظرفیت زراعی (Field Capacity: FC) انجام شد.

تراکم بوته مورد نظر برای کشت ۶۵ هزار بوته در هکتار در نظر گرفته شد که با در نظر گرفتن فاصله ثابت ردیف‌ها به میزان ۷۵ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف ۲۰/۵ سانتی‌متر حاصل شد. تعداد خطوط کاشت برای هر تیمار ۴، و طول خطوط کاشت ۱۰ متر در نظر گرفته شد. برای کاهش اثر سایه و نفوذ آب به کرت‌های مجاور در بین تیمارها دو متر حاشیه در نظر گرفته شد. قبل از اجرای آزمایش نیز چهار پروفیل به عمق ۱۵-۰، ۳۰-۱۵، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متر در نقاط مختلف مزرعه حفر گردید و نمونه‌برداری انجام شد. این نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه برای تعیین میزان کود مصرفی و تعیین ویژگی‌های خاک در رابطه با مقدار آب در نقطه پژمردگی دایم، مقدار آب در ظرفیت زراعی، مقدار آب خاک در نقطه اشباع و وزن مخصوص ظاهری خاک مورد استفاده قرار گرفتند. آبیاری به صورت قطره‌ای نواری با استفاده از نوارهای تیپ انجام شد. جنس نوارهای آبیاری، پلی‌اتیلن به قطر ۲۰ میلی‌متر و فاصله نازل‌ها ۲۰ سانتی‌متر بود. میزان آب داده شده به هر کرت با کنتور با دقت

۰/۱ لیتر در هکتار اندازه‌گیری شد. حجم آب مصرفی در تیمارهای آبیاری براساس معادله ۱ محاسبه شد (Alizadeh *et al.*, 2008؛ Sohrabi and Ghorbani, 2002):

$$VW = (FC - \theta) \times BD \times A \times D / Ea$$ معادله ۱

که در آن VW: حجم آب آبیاری (متر مکعب)، FC درصد وزنی رطوبت خاک در حالت ظرفیت زراعی، θ درصد وزنی رطوبت خاک هنگام نمونه‌برداری، BD وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه (گرم بر سانتی مترمکعب)، A مساحت کرت (مترمربع)، D عمق ریشه (متر) و Ea راندمان آبیاری است. میزان بارندگی در سال ۱۳۹۱ بیشتر از سال ۱۳۹۲ بود و باعث شد تا آب مصرفی کاهش یابد و از طرفی با توجه به نیاز آبی بالای ذرت در طول مراحل کاشت، بارندگی نتوانست نیاز آبی ذرت را تأمین کند و در هر دو سال اجرای آزمایش اختلاف زیادی بین تیمارهای آبیاری مشاهده شد.

آزمایش دوم نیز به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار به مدت دو سال در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان (۱۳۸۶ و ۱۳۸۷) اجرا شده بود. تیمارها شامل سه تاریخ کاشت (۱۵ فروردین، ۳۰ فروردین، ۱۴ اردیبهشت) و دو تراکم بوته (۶/۵ و ۸/۵ بوته در مترمربع) بود. هر تیمار در چهار خط به طول ۱۲ متر با فاصله ۷۵ سانتی‌متر کشت شد. تراکم‌های مورد نظر با توجه به ثابت بودن فاصله خطوط روی ردیف‌های کشت اعمال شدند. سایر مراقبت‌های زراعی مانند کاشت، داشت و برداشت همانند آزمایش اول انجام شد. از داده‌های تراکم ۶/۵ بوته در مترمربع در این مطالعه استفاده شد.

در پایان در هر دو آزمایش، برداشت از دو خط وسط به طول ۶ متر با حذف حاشیه انجام شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS (Anonymous, 1986) استفاده شد و میانگین‌ها به روش LSD در سطح احتمال ۵ درصد مورد مقایسه قرار گرفتند (Soltani, 2007).

واسنجی مدل

مدل با داده‌های جمع‌آوری شده (شامل روز تارسیدگی، روز تا برداشت، عملکرد ماده خشک، حداکثر شاخص سطح برگ، عملکرد دانه و اجزای عملکرد) از تیمار آبیاری مطلوب و بدون تنش در سه تاریخ کاشت (سال ۱۳۹۱) و دو تیمار از آزمایش دوم (پانزدهم و سی فروردین ۱۳۸۶)، واسنجی شد. پس از تعیین مقادیر اولیه ضرایب ژنتیکی در مزرعه، برای تنظیم بهترین ضرایب ژنتیکی آنالیز حساسیت به طور تکراری و بر اساس روش هوگنبوم و همکاران (Hoogenboom *et al.*, 2009) انجام شد.

در مرحله اول چرخه رشد گیاه شامل روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک

کالیبره شد. مقدار P2 برابر ۰/۲ قرار داده شد (در این تحقیق ضریب حساسیت به طول روز (P2) اندازه‌گیری نشد، اما بر اساس یافته‌های تولنار و هانتر (Tollenaar and Thunter, 1983) مقدار آن ۰/۲ در نظر گرفته شد) و به طور متوالی P1 تغییر داده شد تا مقدار روز تا گرده‌افشانی با توجه به PHINT تنظیم شد و مقدار روز تا گرده‌افشانی شبیه‌سازی شده با مقدار مشاهده شده با استفاده از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین R^2 (Coefficient of Determination) و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) بررسی شد و این کار تا وقتی ادامه یافت که بهترین مقادیر حاصل شد. سپس مقدار P5 با توجه به روز تا رسیدگی فیزیولوژیک تنظیم شد. بعد از تنظیم کردن ضرایب P1، P2 و PHINT مقادیر Ax (سطح برگ بزرگ‌ترین برگ)و ALL (طول عمر بزرگ‌ترین برگ) به صورت متوالی تغییر داده شدند تا بهترین شبیه‌سازی از شاخص سطح برگ (LAI) و عملکرد ماده خشک (DM) به دست آمد. در گام بعدی مدل برای عملکرد و اجزای عملکرد کالیبره شد. مقدار سرعت پرشدن دانه در مرحله رشد خطی دانه در شرایط مطلوب (میلی گرم در روز) جهت به‌دست آوردن بهترین مقدار کالیبره شد. تعداد دانه در هر بلال و تعداد دانه در واحد سطح از طریق تنظیم حداکثر پتانسیل تعداد دانه در هر بوته (G2) کالیبره شد. در این مرحله نیز مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده با استفاده از شاخص‌های آماری از جمله جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2)، شاخص توافق (d)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده (PD)[۳] بررسی شدند (معادله ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶).

معادله ۲
$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-o_i)^2}{N}}\times 100$$

معادله ۳
$$Normalized\ RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i-O_i)^2}{N}}\times\frac{100}{\bar{O}}$$

معادله ۴
$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi-\bar{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2}$$

معادله ۵
$$d=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi-O)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|Pi-\bar{O}|+|Oi-\bar{O}|)^2}$$

معادله ۶
$$PD=(P_i-O_i)\times\frac{100}{O_i}$$

ارزیابی مدل

ارزیابی مدل با استفاده از تیمارهایی که در مرحله واسنجی مدل مورد استفاده قرار نگرفته بودند انجام شد و در ادامه برای تعیین نقاط قوت و ضعف مدل، ارزیابی در تاریخ کاشت‌های مختلف و رژیم‌های آبیاری متفاوت انجام شد. برای ارزیابی مدل تاریخ‌های گرده‌افشانی، رسیدگی فیزیولوژیکی، عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک و حداکثر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده با مدل با داده‌های مشاهده شده در مزرعه مقایسه شدند. برای مقایسه از شاخص‌های آماری مختلف (RMSE، R^2، d و NRMSE) استفاده شد

(Loague and Green, 1991).

در معادله‌های بالا Pi، Oi، $\bar{O}$ و PD به ترتیب مقـادیر پـیش‌بینـی شـده، مشـاهده شـده، میـانگین مشـاهدات بـرای متغیـرهـای مـورد مطالعـه و انحـراف مقـادیر شـبیه‌سـازی شـده و N تعداد مشاهدات است. NRMSE بر حسب درصـد بیـان مـی‌شـود و بیـانگر درصـد اخـتلاف نسـبی مقـادیر انـدازه‌گیـری شـده و مشاهده شـده اسـت. اگـر NRMSE بـه‌دسـت آمـده کمتـر از ۱۰ درصـد باشـد شـبیه‌سـازی بسـیار عـالی، اگـر بـین ۱۰ درصـد تـا ۲۰ درصـد باشـد شـبیه‌سـازی خـوب، اگـر بین ۲۰ درصـد تـا ۳۰ درصد باشـد شـبیه‌سـازی نسبتاً خوب و در صورتی که این شاخص آماری بزرگ‌تر از ۳۰ درصد باشد شبیه‌سازی ضعیف است (Jamieson *et al.,* 1991).

واسنجی مدل IXIM

ضـرایب ژنتیکـی محاسـبه شـده بـه ایـن صـورت بودنـد کـه مقـدار P1 [(دوره دمـایی بـر حسـب درجـه- روز (دمـای پایـه ۸ درجـه سـانتی‌گـراد) از زمـان ظهـور گیاهچـه تـا پایـان فـاز جـوانی کـه در ایـن مـدت گیـاه بـه تغییـرات طـول روز حسـاس نیسـت)] در مـدل IXIM برابـر ۲۵۶ بـه دسـت آمـد و مقـدار P2 در کـالیبره کـردن برابـر ۰/۲ قرار داده شد. ضرایب ژنتیکی محاسبه شـده نشان داد که مقادیر G2 و G3 (که تعداد دانه در هر بلال، تعداد دانـه در واحـد سـطح و عملکـرد دانـه را شـبیه‌سـازی مـی‌کنـد)، معـادل ۷۷۰ و ۷/۱ است.

نتایج واسنجی مدل

نتایج واسنجی برای روز تا گرده‌افشانی نشان داد که اختلافی بین مقـادیر شـبیه‌سـازی شـده و انـدازه‌گیـری شـده وجـود نداشـت و مقـدار مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده برابر ۵۹ روز بود. همچنین جذر میانگین مربعات خطـا(RMSE) و شاخص توافق(d) برای روز تا گرده‌افشانی و بـه ترتیب برابر ۱ روز و ۹۹ درصـد بـه دسـت آمـد. جذر میانگین مربعات خطا برای روز تا رسیدگی ۲/۵ روز به دسـت آمـد. مقـدار شـاخص توافـق برای روز تا رسیدگی ۹۷ درصد بـه دسـت آمـد کـه نشـان مـی‌دهـد مـدل بـا دقـت بـالایی روز تـا گـرده‌افشـانی را شـبیه‌سـازی مـی‌کنـد. عملکـرد مـاده خشـک شـبیه‌سـازی شـده کمتر از ماده خشک مشاهده شده به دست آمد. مقـدار ضـریب تبیـین (R^2) و شـاخص توافـق برای ماده خشک به ترتیب برابر ۸۰ و ۸۳ درصد بـه دسـت آمـد کـه نشـان مـی‌دهـد مـدل عملکـرد مـاده خشـک را بـا دقـت خـوبی شبیه‌سازی مـی‌کنـد. عملکـرد دانـه شـبیه‌سـازی شده بیشـتر از عملکـرد دانـه مشـاهده شـده بـود. RMSE برای عملکرد دانـه کمتـر از ۱۵ درصـد عملکـرد مشـاهده شـده بـود. حـداکثر شـاخص سطح برگ، نیز بر اساس شاخص‌هـای کـارکرد مدل (RMSE، NRMSE، d و R^2) در محدوده قابل قبولی قرار داشت.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیاوی خاک محل آزمایش در جدول ۱، آمار هواشناسی ایستگاه هواشناسی منطقه آزمایش در جدول ۲، مقدار آب مصرفی و بارندگی در دوره رشد ذرت در سال‌های آزمایش در جدول ۳، ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای مدل IXIM در جدول ۴ و نتایج واسنجی مدل IXIM برای ذرت سینگل کراس ۷۰۴ در جدول ۵ نشان داده شده‌اند.

پیش‌بینی تعداد روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی

نتایج حاصل از ارزیابی کلی مدل IXIM در مراحل گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیکی در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ در شرایط آب‌وهوایی گرگان نشان داد که مدل با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی کرده است، به‌طوری که RMSE، NRMSE، d و R^2 به عنوان شاخص‌های کارکرد مدل، برای روز تا گرده افشانی برابر به ترتیب ۲/۶ روز، ۴/۹، ۹۴ و ۸۰ درصد و برای روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی برابر ۲/۴ روز، ۲/۴، ۹۷ و ۹۳ درصد بود (شکل ۱). با تأخیر در کاشت در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ دما کاهش یافت و روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی مشاهده شده افزایش یافت. همچنین روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل نیز روند افزایشی داشت، ولی مقادیر روز تا گرده‌افشانی شبیه‌سازی شده دارای روند یکسانی نبود (جدول ۶). ارزیابی مدل در تاریخ کاشت‌های تابستانه و در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نیز نشان داد که با تأخیر در کاشت میزان دقت برای روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی کاهش می‌یابد و بیشترین جذر میانگین مربعات خطا برای روز تا گرده‌افشانی از تاریخ کاشت پانزدهم تیرماه (به میزان ۲/۲۴ روز) و روز تا رسیدگی از تاریخ کاشت سی تیرماه (به میزان ۱۱- روز) به دست آمد (جدول ۶). خلیق (Khaliq, 2008) در یک بررسی با استفاده از مدل CERES-Maize نشان داد که افزایش دما باعث تسریع مراحل نموی از جمله روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی می‌شود. نتایج حاصل از مقادیر مشاهده شده نشان داد که با کاهش میزان آب آبیاری روز تا گرده‌افشانی افزایش، ولی روز تا رسیدگی کاهش یافت و مدل IXIM نتوانست تأثیر کاهش میزان آب آبیاری را روی روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی به خوبی شبیه‌سازی نماید. با افزایش تنش آب، شاخص‌های کارکرد مدل کاهش یافتند، به طوری که بیشترین جذر میانگین مربعات خطا در تیمار تنش کامل برای روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی به ترتیب معادل ۴/۲۹ و ۱۷/۰۹ به دست آمد. در این تیمار (تنش کامل آبیاری) درصد تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده برای روز تا رسیدگی معادل ۷/۱- به دست آمد که نشان می‌دهد مدل روز تا گرده‌افشانی را کمتر از مقادیر مشاهده شده شبیه‌سازی می‌کند (جدول ۶). با این حال میزان خطا در پیش‌بینی

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1. Physical and chemical characteristics of soil of experimental site

Soil characteristic	ویژگی‌های خاک	Depth (cm) عمق			
		0-15	15-30	30-60	60-90
pH	اسیدیته	7.20	7.30	7.30	7.30
Ec (dSm^{-1})	درصد کاتیون‌های قابل تبادل	1.35	1.27	1.42	1.41
Organic carbon (%)	درصد کربن آلی	1.50	1.10	0.60	0.40
Total nitrogen (%)	درصد نیتروژن کل	0.15	0.11	0.06	0.03
Available phosphor (ppm)	فسفر قابل دسترس	8.60	4.80	2.00	1.01
Available potassium (ppm)	پتاسیم قابل دسترس	333.00	220.00	108.00	70.00
Bulk density (gcm^{-3})	وزن مخصوص ظاهری	1.44	1.41	1.40	1.40
Soil texture	**بافت خاک**				
Clay (%)	درصد رس	28	30	34	33
Silt (%)	درصد سیلت	54	52	52	52
Sand (%)	درصد شن	18	18	14	15
Soil texture	بافت خاک	لوم سیلتی Loam- Silty	لوم سیلتی Loam- Silty	لوم رسی- سیلتی Silty -Clam -loam	لوم رسی- سیلتی Silty -Clam -loam
Water content	**محتوای آب خاک**				
Saturation point (%) (θ_m)	نقطه اشباع (٪ حجمی)	49.9	52.2	51.90	60.00
Field capacity (%)(θ_m)	ظرفیت زراعی (٪ حجمی)	27.7	27.0	6.27	7.27
Wilting point (%)(θ_m)	نقطه پژمردگی دائم (٪ حجمی)	13.1	12.3	9.80	9.80

جدول ۲- آمار هواشناسی ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان در طول فصل رشد ذرت (سینگل‌کراس ۷۰۴) در سال‌های مختلف

Table 2. Meteorological data of Agricultural Research Station of Gorgan during cropping growth period of maize in different years

سال Year	ماه Month		حداقل دما Minimum temperature (°C)	حداکثر دما Maximum temperature (°C)	بارندگی Rainfall (mm)
۱۳۸۶ 2007	April	فروردین	8.5	16.6	53.9
	May	اردیبهشت	12.4	23.7	33.0
	June	خرداد	18.6	33.8	17.6
	July	تیر	22.0	31.5	3.9
	August	مرداد	22.5	35.3	20.0
۱۳۸۷ 2008	April	فروردین	10.4	23.6	6.5
	May	اردیبهشت	13.2	24.7	18.0
	June	خرداد	17.9	30.5	13.6
	July	تیر	22.2	32.5	7.6
	August	مرداد	23.6	35.2	0.05
۱۳۹۱ 2012	July	تیر	22.8	31.6	136.9
	August	مرداد	22.9	35.0	0.0
	September	شهریور	19.6	32.7	37.5
	October	مهر	13.9	29.2	94.5
	November	آبان	8.9	23.5	34.1
۱۳۹۲ 2013	July	تیر	23.2	33.9	0.2
	August	مرداد	22.0	32.2	25.1
	September	شهریور	29.1	33.3	0.0
	October	مهر	16.2	28.2	67.9
	November	آبان	9.8	20.8	31.5
	April	فروردین	11.3	23.5	60.3
	May	اردیبهشت	13.9	26.6	47.2
	June	خرداد	18.5	29.9	35.7
	July	تیر	23.6	34.3	52.1
	August	مرداد	24.6	35.8	43.3
	September	شهریور	20.0	30.4	49.3
	October	مهر	14.6	26.9	133.7
	November	آبان	7.4	15.9	67.6

جدول ۳- میزان آب مصرفی و بارندگی در طول فصل رشد ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲

Table 3. Applied water and rainfall in Maize (SC.704) growth period in 2012 and 2013

		Year سال			
		2012	۱۳۹۱	2013	۱۳۹۱
Treatment	تیمار	میزان آب مصرفی Applied Water ($mmha^{-1}$)	بارندگی Rainfall ($mmha^{-1}$)	میزان آب مصرفی Applied Water ($mmha^{-1}$)	بارندگی Rainfall ($mmha^{-1}$)
22 June × MAD= 40%	اول تیر × ٪ ۴۰ =MAD	453.3	174.0	723.0	25.3
22 June × MAD= 60%	اول تیر × ٪ ۶۰ =MAD	383.3	174.0	640.0	25.3
22 June × MAD= 80%	اول تیر × ٪ ۸۰ =MAD	283.3	174.0	35.3	25.3
22 June × No irrigation	اول تیر × بدون آبیاری	88.0	174.0	72.6	25.3
6 July × MAD= 40%	پانزدهم تیر × ٪ ۴۰ =MAD	377.0	179.0	489.0	79.2
6 July × MAD= 60%	پانزدهم تیر × ٪ ۶۰ =MAD	313.3	179.0	379.6	79.2
6 July × MAD= 80%	پانزدهم تیر × ٪ ۸۰ =MAD	225.0	179.0	241.0	79.2
6 July × No irrigation	پانزدهم تیر × تنش کامل آبیاری	76.0	179.0	81.0	79.2
21 July × MAD= 40%	سی تیر × ٪ ۴۰ =MAD	290.3	136.5	409.0	97.0
21 July × MAD= 60%	سی تیر × ٪ ۶۰ =MAD	225.0	136.5	263.0	97.0
21 July × MAD= 80%	سی تیر × ٪ ۸۰ =MAD	133.3	136.5	182.6	97.0
21 July × No irrigation	سی تیر × تنش کامل آبیاری	21.0	136.5	75.0	97.0

MDA: آب قابل استفاده

روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی در محدوده مشاهدات سایر محققان (Gungula et al., 2003؛ Mavromatis et al., 2002؛ Irmak et al., 2000) قرار دارد. هوگنبوم و همکاران (Hoogenboom et al, 2003) بیان گزارش دادند که شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی تحت تأثیر محتوای رطوبتی خاک قرار نمی‌گیرد. علاوه بر نقش مهم مراحل نموی در مدیریت مزرعه، تعیین زمان دقیق این مراحل برای شبیه‌سازی رشد اندام‌های گیاهی و در نهایت عملکرد دانه نیز دارای اهمیت است، چون میزان تسهیم مواد فتوسنتزی بین اندام‌های رویشی و زایشی گیاه (ضرایب تخصیص)متناسب با مراحل نموی گیاه انجام می‌شود (Soltani, 2008؛ Andarzian et al., 2007). از طرفی ممکن است پیش‌بینی تغییرات سطح برگ و سایر فرآیندها به پیش‌بینی نمو فنولوژیک وابسته باشد، از این رو پیش‌بینی دقیق مراحل فنولوژی دارای اهمیت زیادی است (Soltani, 2008).

عملکرد ماده خشک

نتایج ارزیابی کلی مدل IXIM تحت تأثیر تاریخ کاشت‌های متفاوت و رژیم‌های آبیاری

جدول ۴- ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای مدل IXIM در ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ و توضیح هر کدام
Table 4. Calculated genetic coefficients for IXIM model in maize (SC704) and definition of them

ضریب Coefficients	تعریف Definition	واحد Units	ضرایب ژنتیکی محاسبه شده Calculated Coefficients
P1	دوره دمایی بر حسب درجه- روز (دمای پایه ۸ درجه سانتی‌گراد) از زمان ظهور گیاهچه تا پایان فاز جوانی که در این مدت گیاه به تغییرات طول روز حساس نیست. Thermal time (T_{base} 8ºC) from seedling emergence to end of juvenile phase during which the plant is not responsive to photoperiod day)	درجه سانتی‌گراد بالای ۸ درجه سانتی‌گراد ºC day above 8ºC	256
P2	تأخیر در نمو بر حسب روز به ازای هر ساعت افزایش در فتوپریود بیش از ۱۲/۵ ساعت (سرعت نمو حداکثر در طول روز ۱۲/۵ ساعت). Delay in development (days) for each hour that day length is above 12.5 hours (0 -1). If day length is less than 12.5 hours, development occurs at maximum rate.	طول روز Days hr^{-1}	0.2
P5	درجه روز رشد از ظهور گل ابریشم تا رسیدگی فیزیولوژیکی Degree days from silking to physiological maturity	درجه روز با دمای پایه بالاتر از ۸ درجه سانتی‌گراد) ºC day above 8ºC	765
G2	حداکثر تعداد دانه در هر بوته Maximum possible number of kernels per plant	تعداد در بوته Number $plant^{-1}$	770
G3	سرعت رشد دانه در مرحله خطی پر شدن دانه در شرایط بهینه Kernel growth rate during linear grain filling stage under optimum conditions	میلی‌گرم بر روز mg $kernel^{-1}day^{-1}$	7.1
PHINT	زمان حرارتی لازم بین ظهور نوک دو برگ متوالی Phyllochron interval. The interval in thermal time between successive leaf tip appearances	درجه‌روز ºC day tip^{-1}	42.5
Ax	سطح برگ بزرگ‌ترین برگ Leaf surface area of largest leaf	سانتی‌متر مربع cm^2 $leaf^{-1}$	790
ALL	طول عمر بزرگ‌ترین برگ Leaf longevity of the most longevous leaf	درجه سانتی‌گراد در روز ºC day	895

در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نشان داد که دقت مدل در شبیه‌سازی ماده خشک در حد قابل قبولی قرار دارد، به طوری که مقادیر RMSE، NRMSE، d و R^2 به عنوان شاخص‌های ارزیابی کارکرد مدل، به ترتیب معادل ۲۵۱۷ کیلوگرم در هکتار، ۲۰/۹، ۹۶ و ۹۰ درصد به دست آمد (شکل ۱). بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در تاریخ کاشت‌های متفاوت در سال ۱۳۸۷ نشان داد که جذر میانگین مربعات خطا برابر ۱۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین NRMSE بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و درصد تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده به ترتیب معادل ۶/۲ و ۶- درصد بود که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی عملکرد ماده خشک در تاریخ کاشت‌های بهاره است (جدول۶). نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در تاریخ کاشت‌های تابستانه در سال ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نیز نشان داد که مدل در شبیه‌سازی عملکرد ماده خشک در هر سه تاریخ کاشت موفق بوده است، به طوری که در هر سه تاریخ کاشت ضریب تبیین بالای ۰/۹۳ درصد به‌دست آمد و بیشترین NRMSE از تاریخ

جدول ۵- نتایج واسنجی مدل IXIM در ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان

Table 5. Results of calibration IXIM model in maize (SC704) in Agricultural Research Station of Gorgan

		Mean میانگین		Statistical indexes شاخص‌های آماری					
Treatments	صفات	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	ضریب تبیین R^2	جذر میانگین مربعات خطا RMSE	تعداد مشاهدات n	جذر میانگین مربعات نرمال NRMSE	شاخص توافق d	اختلاف میانگین‌ها Mean Diffrence
Anthesis day	روز تا گرده‌افشانی	59.00	59.00	0.98	1.00	5	1.7	0.99	0.00
Day to maturity	روز تا رسیدگی	102.00	103.00	0.92	2.50	5	2.4	0.97	1.00
Dry matter yield (Kgha-1)	عملکرد ماده خشک	17554.00	17453.00	0.8	1963.00	5	11.1	0.83	-122.00
Seed yield (Kgha-1)	عملکرد دانه	8279.00	8374.00	0.82	779.00	5	14.2	0.55	95.00
Leaf area index	شاخص سطح برگ	4.42	4.45	0.62	0.67	5	15.1	0.69	-0.03

کاشت اول تیرماه به میزان ۳۰ درصد به‌دست آمد (جدول ۶). بر اساس اطلاعات مندرج در جدول ۶، با کاهش میزان آبیاری، عملکرد ماده خشک کاهش یافت. چنین واکنشی هم در مقادیر مشاهده شده و هم شبیه‌سازی شده عملکرد ماده خشک دیده شد که علت اصلی آن افزایش تنش آبی است. فتوسنتز و به طور عام تولید ماده خشک به وسیله گیاه به میزان آب قابل دسترس برای گیاه بستگی دارد و با افزایش میزان آبیاری، عملکرد ماده خشک افزایش می‌یابد (Yazr *et al.,* 1999؛ Eck, 1984). ارزیابی مدل در شبیه‌سازی اثرات رژیم‌های آبیاری بر روی عملکرد ماده خشک در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نیز نشان داد که بهترین کارکرد مدل از آبیاری MAD = %60 به‌دست آمد و با افزایش تنش آبی دقت مدل کاهش یافت، به‌طوری که بیشترین NRMSE در مدل IXIM از تیمار تنش کامل ۵۶/۲ درصد به‌دست آمد (جدول۶). بر اساس گزارش‌های هوگنبوم و همکاران (۲۰۰۳)، در این آزمایش نیز شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی (روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی) تحت تأثیر محتوای رطوبتی خاک قرار نگرفت، از طرفی چون تولید و توزیع ماده خشک تا حد زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی است (Soltani, 2008)، لازم است تا در معادلات به کار رفته در قسمت شبیه‌سازی مراحل فنولوژی (در تیمارهای تنش خشکی) تجدید نظر شود.

عملکرد دانه

نتایج ارزیابی کلی مدل IXIM نشان داد که مدل دقت خوبی در شبیه‌سازی عملکرد دانه دارد. به طوری که مقادیرRMSE، NRMSE، d و R^2 به عنوان شاخص‌های ارزیابی کارکرد مدل به‌ترتیب معادل ۱۷۱۰ کیلوگرم در هکتار، ۲۹/۵، ۹۱ و ۷۱ درصد به دست آمد (شکل ۱). ارزیابی مدل در سال ۱۳۸۷ (در سه تاریخ کشت پانزدهم فروردین، سی فروردین و پانزدهم اردیبهشت) نشان داد که مدل دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی تاریخ کاشت‌های بهاره دارد (جدول ۶). نتایج ارایه شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که با تأخیر در کاشت در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ عملکرد دانه مشاهده شده کاهش یافت، ولی مدل روندی افزایشی را برای عملکرد دانه شبیه‌سازی کرد، جبرین و همکاران (Jibrin *et al.,* 2012) نیز گزارش کردند که با تأخیر در کاشت عملکرد دانه کاهش یافت، ولی مدل CERES-Maize روند عملکرد دانه را افزایشی شبیه‌سازی کرد. بنایان و همکاران (Bannayan *et al.,* 2004) در مطالعه‌ای در شرایط کنترل شده با استفاده از مدل CERES-Maize به بررسی شبیه‌سازی تأثیر دماهای متفاوت و فتوپریودهای مختلف روی نه هیبرید ذرت پرداختند. تیمارها در این آزمایش شامل نه طول روز (۱۶–۸ ساعت)، دمای حداقل (۳۵– ۵ درجه سانتی‌گراد) و دمای حداکثر (۴۵–۱۵ درجه سانتی‌گراد) بود. نتایج نشان داد که

جدول ۶- نتایج ارزیابی مدل IXIM در ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ برای صفات مختلف در تاریخ کشت‌های مختلف و رژیم‌های متفاوت آبیاری در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان

Table 6. Results of IXIM model evaluation in maize (SC704) for different traits in different sowing dates different irrigation regimes at agricultural research station of Gorgan

Treatment	تیمار	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	اختلاف میانگین‌ها Mean difference	جذر میانگین مربعات RMSE	شاخص آماری توافق ویلموت d (%)	ضریب تبیین R^2	جذر میانگین مربعات نرمال NRMSE	انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده PD	تعداد مشاهدات n
Days to onthesis	**روز تا گرده‌افشانی**									
3th April, 18th April and 3th May (2008)	پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۱۳۸۷	67	68	1	0.82	99	89	1.2	1.5	3
22 th June (2013)	اول تیر ۱۳۹۲	54	53	-1	1.58	33	--	2.9	-1.9	4
6 th July (2013)	پانزده تیر ۱۳۹۲	52	54	2	2.24	47	--	4.3	3.8	4
21 th July (2013)	سی تیر ۱۳۹۲	56	53	-3	2	0	--	3.5	-5.4	4
MAD= 40% (2013)	MAD= ٪۴۰ (۱۳۹۲)	53	53	0	2	0	--	3.9	0	3
MAD= 60% (2012 and 2013)	MAD= ٪۶۰ (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)	52	52	0	2.16	30	2.2	4.1	0	6
MAD= 80% (2012 and 2013)	MAD= ٪۸۰ (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)	54	52	-2	2.04	37	1.8	3.7	-3.7	6
No irrigation (2012 and 2013)	بدون آبیاری (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)	56	52	-4	4.29	36	7.8	7.6	-7.1	6
Day to maturity	**روز تا رسیدگی**									
3th April, 18th April and 3th May (2008)	پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۱۳۸۷	105	106	1	2.88	93	93	1.9	1	3
22 th June (2013)	اول تیر ۱۳۹۲	92	92	0	0.87	33	0	9.7	0	4
6 th July (2013)	پانزده تیر ۱۳۹۲	95	92	-2	11.6	29	89	1.6	-3.3	4
21 th July (2013)	سی تیر ۱۳۹۲	111	96	-15	27.7	26	98	3.1	-13.9	4
MAD= 40% (2013)	MAD= ٪۴۰ (۱۳۹۲)	101	102	0	1.9	99	97	1.3	1	3
MAD= 60% (2012 and 2013)	MAD= ٪۶۰ (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)	100	100	0	1.9	98	94	2.3	0	6
MAD= 80% (2012 and 2013)	MAD= ٪۸۰ (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)	94	94	0	2.56	79	8.4	8.9	0	6
No irrigation (2012 and 2013)	بدون آبیاری (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)	93	92	-1	17	5.6	72	8.8	-1.1	6

Table 6. Continued

ادامه جدول ۶

Treatment	تیمار	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	اختلاف میانگین‌ها Mean difference	جذر میانگین مربعات RMSE	شاخص آماری توافق ویلموت d (%)	ضریب تبیین R^2	جذر میانگین مربعات نرمال NRMSE	انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده PD	تعداد مشاهدات n
Dry matter yield (kgha^{-1})	**عملکرد ماده خشک**									
3th April, 18th April and 3th May (2008)	پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۱۳۸۷	20657	19411	-1246	1300.2	44	67	6.2	-6	3
22 th June (2013)	اول تیر ۱۳۹۲	13318	9507	-3811	4005	89	98	30	-28.6	4
6 th July (2013)	پانزده تیر ۱۳۹۲	12106	9872	-2234	3024.9	94	95	24.9	-18.5	4
21 th July (2013)	سی تیر ۱۳۹۲	10472	10014	-458	1720.1	98	95	16.4	-4.4	4
MAD= 40% (2013)	MAD= ٪۴۰ (۱۳۹۲)	19279	15021	-4258	4629	20	64	24	-22.1	3
MAD= 60% (2012 and 2013)	MAD= ٪۶۰ (۱۳۹۱ و۱۳۹۲)	15276	14513	-763	2579	40	6.4	16.8	-5	6
MAD= 80% (2012 and 2013)	MAD= ٪۸۰ (۱۳۹۱ و۱۳۹۲)	10388	9413	-975	2190	58	7.3	21	-9.4	6
No irrigation (2012 and 2013)	بدون آبیاری (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)	2729	1362	-1367	1534	73	78	56.2	-5	6
Grain yield (kgha^{-1})	**عملکرد دانه**									
3th April, 18th April and 3th May (2008)	پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۱۳۸۷	9678	8273	-1405	1424.5	34	77	14.7	-14.5	3
22 th June (2013)	اول تیر ۱۳۹۲	6209	4269	-1940	1841	89	99	29.6	-31.2	4
6 th July (2013)	پانزده تیر ۱۳۹۲	5572	5270	-302	1229	96	90	22	-5.4	4
21 th July (2013)	سی تیر ۱۳۹۲	4720	6755	2035	1269	87	90	26.8	-43.1	4
MAD= 40% (2013)	MAD= ٪۴۰ (۱۳۹۲)	9486	8936	-550	2915	1.2	91	30	-5.8	3
MAD= 60% (2012 and 2013)	MAD= ٪۶۰ (۱۳۹۱ و۱۳۹۲)	7046	8383	1337	3090	0.2	31	25.9	19	6
MAD= 80% (2012 and 2013)	MAD= ٪۸۰ (۱۳۹۱ و۱۳۹۲)	4286	4624	338	1079	62	26	25	7.9	6
No irrigation (2012 and 2013)	بدون آبیاری (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)	603	132	-471	606	59	34	100	-78.1	6

Table 6. Continued

ادامه جدول ۶

Treatment	تیمار	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	اختلاف میانگین‌ها Mean difference	جذر میانگین مربعات RMSE	شاخص آماری توافق ویلموت d (%)	ضریب تبیین R^2	جذر میانگین مربعات نرمال NRMSE	انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده PD	تعداد مشاهدات n
Maximum leaf area index	**حداکثر شاخص سطح برگ**									
3th April, 18th April and 3th May (2008)	پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۱۳۸۷	4.89	5.18	0.29	0.22	41	60	4	5.9	3
22 th June (2013)	اول تیر ۱۳۹۲	4	2.35	-1.65	1.88	55	91	47	-41.3	4
6 th July (2013)	پانزده تیر ۱۳۹۲	3.6	2.94	-0.66	0.81	87	98	21.6	-18.3	4
21 th July (2013)	سی تیر ۱۳۹۲	3.29	3	-0.29	0.68	93	100	5.7	-8.8	4
MAD= 40% (2013)	MAD= ٪۴۰ (۱۳۹۲)	4.41	4.23	-0.18	0.45	18	48	10.2	-4	3
MAD= 60% (2012 and 2013)	MAD= ٪۶۰ (۱۳۹۱ و۱۳۹۲)	4	4	0	0.512	44	1	12.8	0	6
MAD= 80% (2012 and 2013)	MAD= ٪۸۰ (۱۳۹۱ و۱۳۹۲)	3.55	2.65	-0.9	1.33	2.7	0.1	7	34	6
No irrigation (2012 and 2013)	بدون آبیاری (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)	2.54	1.3	-1.24	1.43	50	55	56.2	95.3	6
Evatranspiration	**تبخیر و تعرق**									
3th April, 18th April and 3th May (2008)	پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۱۳۸۷	532	318	-214	280.1	91	98	52.7	67.3	4
22 th June (2013)	اول تیر ۱۳۹۲	396	296	-100	113.8	96	84	28.1	33.7	4
6 th July (2013)	پانزده تیر ۱۳۹۲	317	314	-3	59.1	99	93	18.6	0.95	4
21 th July (2013)	سی تیر ۱۳۹۲	689	438	-251	209.4	93	87	30	57.3	3
MAD= 40% (2013)	MAD= ٪۴۰ (۱۳۹۲)	477	425	-52	126.3	97	71	26.7	12.2	6
MAD= 60% (2012 and 2013)	MAD= ٪۶۰ (۱۳۹۱ و۱۳۹۲)	326	330	4	10.4	99	79	3.3	-1.2	6
MAD= 80% (2012 and 2013)	MAD= ٪۸۰ (۱۳۹۱ و۱۳۹۲)	68	147	79	5.01	75	16	7.4	-53.7	6
No irrigation (2012 and 2013)	بدون آبیاری (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)	532	318	-214	280.1	91	98	52.7	67.3	4

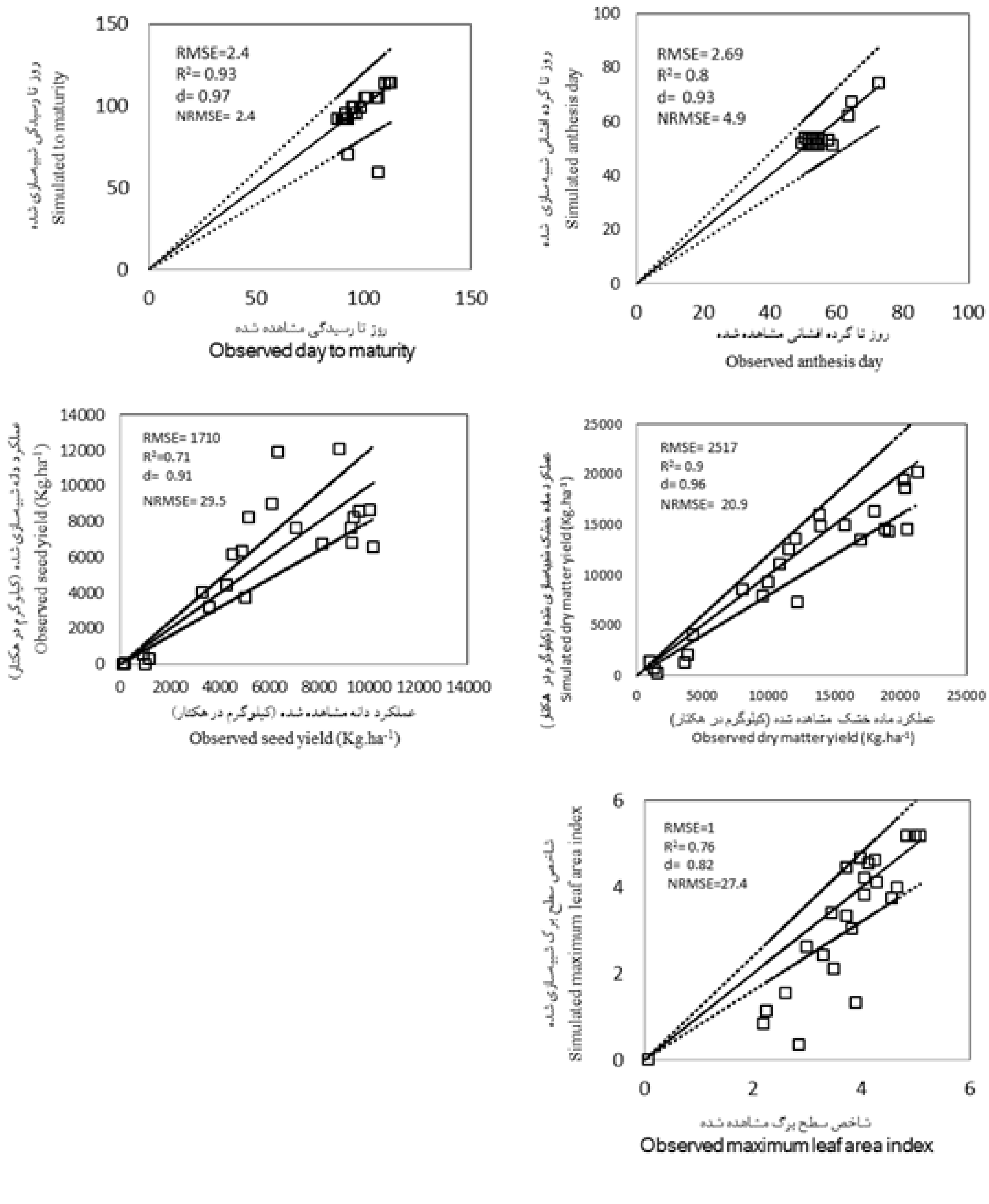
افزایش دمای حداکثر تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد بدون افزایش دمای حداقل باعث افزایش عملکرد و دمای بیشتر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش عملکرد ماده خشک دانه در هر نه هیبرید ذرت شد. همچنین افزایش دما باعث تسریع در روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی شد و بیشترین عملکرد دانه در حداکثر دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و حداقل دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد و میزان عملکرد ماده خشک در این شرایط ۱۰/۲ تا ۲۳/۲ تن در هکتار به دست آمد. نامبردگان اظهار کردند فتوپریود بر روی صفات مورد بررسی تأثیری نداشت، زیرا هیبریدهای مورد بررسی حساسیت کمی به طول روز داشتند. در این آزمایش نیز با تأخیر در کاشت طی سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ دمای حداکثر کاهش و عملکرد دانه شبیه‌سازی شده افزایش نشان داد. از طرفی چون عملکرد دانه از طریق ضریب ژنتیکی G2 (سرعت پرشدن دانه) کنترل می‌شود و میانگین دمای روزانه بر میزان سرعت پرشدن دانه مؤثر است و از سوی دیگر در این مطالعه با تأخیر در کاشت، دمای حداکثر کاهش (جدول۲) و روز تا رسیدگی و روز تا گرده‌افشانی افزایش یافت، و این روند هم در مقادیر مشاهده شده و هم در مقادیر شبیه‌سازی شده به دست آمد (جدول ۶)، بنابراین طول دوره پرشدن افزایش یافته و عملکرد با تأخیر در کاشت در مدل افزایش نشان داد. نتایج این بررسی با یافته‌های ساسن‌درام (Saseendran, 2005) و نیز جبرین و همکاران (Jibrin *et al.*, 2012) هماهنگی دارد. بررسی اثر رژیم‌های آبیاری نشان داد که مدل در شبیه‌سازی اثر رژیم‌های آبیاری توانست روند کاهشی عملکرد دانه را با کاهش میزان آبیاری به خوبی شبیه‌سازی کند و شاخص‌های کارکرد مدل در تیمارهای آبیاری در محدوده مطلوبی قرار داشتند و کمترین دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه از تیمار تنش کامل به دست آمد، به‌طوری که مقدار NRMSE برابر ۱۰۰ درصد به دست آمد و مدل عملکرد دانه شبیه‌سازی شده را در تیمار تنش کامل، کمتر از مقدار مشاهده شده شبیه‌سازی کرد و مدل نتوانست عملکرد دانه را در شرایط تنش کامل آبیاری به خوبی شبیه‌سازی کند. با توجه به ساده‌سازی انجام شده در بخش شبیه‌سازی آب و خاک و تبخیر و تعرق بسته DSSAT برای شبیه‌سازی رشد ذرت دچار مشکلاتی است (Faria and Bowen, 2003؛ Dejonge, 2011).

حداکثر شاخص سطح برگ

نتایج ارزیابی عمومی مدل در شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ تحت تأثیر تاریخ کاشت‌های متفاوت و رژیم‌های آبیاری در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نشان داد که RMSE، NRMSE، d و R^2 به ترتیب معادل ۱/۰۲، ۲۷/۴، ۸۲ و ۷۶ درصد به دست آمد (شکل ۱). بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در سال ۲۰۰۸ نیز نشان داد که RMSE، D،

R^2 و NRMSE بـه ترتیـب برابـر ۰/۲۲، ۴۱، ۶۰ و ۴۰ درصـد بودنـد و درصـد تغییـرات مقـادیر شبیه‌سازی شده در سال ۲۰۰۸ معادل ۵/۹ درصد بود که نشان می‌دهد مدل حداکثر سطح برگ را بیشتر از مقادیر مشاهده شـده شـبیه‌سـازی کـرده است، بنابراین دقت مدل در شبیه‌سازی حـداکثر شاخص سطح برگ در تاریخ کاشت‌های بهـاره قابـل قبـول اسـت. ارزیـابی مـدل در تـاریخ کاشت‌های تابستانه نشان داد که بیشـترین مقـدار NRMSE از تاریخ کاشت اول تیرماه بـه میـزان ۴۷ درصد به دست آمد و در تاریخ کاشت‌هـای بعدی (پانزدهم و سی تیر) دقت مـدل بـر اسـاس شاخص‌هـای آمـاری در محـدوده مناسـبی قـرار دارد. احتمالاً دماهای بالا در این تـاریخ کاشـت (اول تیر) یکی از دلایلی است که باعث می‌شود مدل نتواند شبیه‌سـازی حـداکثر شـاخص سـطح برگ را به خوبی انجام دهد، زیرا دما مهـم‌تـرین عامل محدودکننده گسترش سـطح بـرگ اسـت (Soltani, 2008). بر اساس نتایج، مـدل مقـادیر شاخص سطح برگ را کمتر از مقدار پیش‌بینـی شده شبیه‌سازی کـرد و درصـد تغییـرات مقـادیر شـبیه‌سـازی شـده بـا تـأخیر در کاشـت کـاهش یافت، به طـوری کـه کمتـرین درصـد تغییـرات مقادیر شبیه‌سازی شده از تاریخ کاشت سـی تیـر (معادل ۴/۰۸ درصد) به دست آمد (جدول ۶). با کاهش میـزان آبیـاری حـداکثر شـاخص سـطح برگ کاهش یافت و این رونـد کاهشـی هـم در مقادیر مشاهده شده و هم در مقادیر شـبیه‌سـازی شده، مشاهده شد. با این حـال ارزیـابی مـدل در شبیه‌سازی حداکثر شاخص سـطح بـرگ تحـت تأثیر اثر رژیم‌های آبیاری متفاوت بود، به طوری که در تیمار MAD = %40 بهترین شـبیه‌سـازی حـداکثر شـاخص سـطح بـرگ (بـر اسـاس شـاخص‌هـای کـارکرد مـدل) انجـام شـد. در تیمارهای MAD = %80 و MAD = %60 هـر چند ضریب تبیین پایینی به‌دسـت آمـد، ولـی بـه دلیل کوچک بودن مقدار RMSE و NRMSE می‌تـوان گفـت شـبیه‌سـازی خـوب انجـام شـده است، ولی در تیمار تنش کامل مقدار NRMSE برای مدل IXIM به میزان ۵۶/۲ درصد بـه‌دسـت آمد و شبیه‌سازی از دقـت لازم برخـوردار نبـود. یکی از دلایل کاهش سطح برگ مشاهده شـده می‌تواند که در دماهای بـالا و تیمارهـای تحـت تـنش، بـرگ‌هـای ذرت بـه صـورت لولـه‌ای در می‌آیند و میزان خطا در اندازه‌گیری سطح برگ افزایش می‌یابد.

با افزودن دو ضریب ژنتیکی در مـدل IXIM که شاخص سطح برگ را شبیه‌سـازی مـی‌کننـد شـبیه‌سـازی حـداکثر شـاخص سـطح بـرگ تـا حدودی نسبت به مـدل CERES- Maize بهتـر مـی‌شـود (نتـایج مـدل CERES- Maize آورده نشـده اسـت). محققـان زیـادی گـزارش کرده‌اند که مدل CERES- Maize در رطوبـت ناکافی خاک (تیمارهـای کـم‌آبیـاری) از دقـت کافی برخوردار نیست. دی جونـگ و همکـاران (DeJonge *et al.*, 2011) با انجام آزمایش‌هائی در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ که شـامل تیمارهـای آبیاری مطلوب و تنش آبیـاری روی ذرت و در



شکل ۱- ارزیابی مدل IXIM برای ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ در تاریخ کشت‌های مختلف و رژیم‌های آبیاری متفاوت در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲

خطوط مورب، خط ۱:۱ را با حدود اطمینان ۲۰± نشان می‌دهد و نقاط داده‌های جمع‌آوری شده در مزرعه را نشان می‌دهند.

Fig. 1. Evaluation of IXIM model for maize (SC704)in different sowing date and different irrigation regime during 2008, 2012 and 2013

The diagonal lines in the graphs are the 1:1 lines with confidence of ±20 and The data points in each frame represent data collected from the farm.

آمریکا بود گزارش کردند که مدل CERES- Maize عملکرد را در شرایط آبیاری مطلوب به خوبی شبیه‌سازی می‌کند، ولی در شرایط کم‌آبیاری میزان تبخیر و تعرق را بیشتر از مقدار مشاهده شده شبیه‌سازی می‌کند. دوگان (Dogan, 2006) نیز به نتایج مشابهی دست یافت. قابلیت پیش‌بینی تغییرات سطح برگ در مدل‌های شبیه‌سازی سطح برگ در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی دارای اهمیت است. پیش‌بینی شاخص سطح برگ برای تخمین میزان تابش دریافت شده و تولید ماده خشک مورد نیاز است. همچنین پیش‌بینی آن در تعیین توزیع تبخیرو تعرق به تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه مهم است (Soltani, 2008).

تبخیر و تعرق

نتایج حاصل از شبیه‌سازی تبخیر و تعرق در مدل IXIM در تاریخ کشت‌های تابستانه (اول، پانزدهم و سی تیر در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۱) و تیمارهای کم‌آبیاری نشان داد که این مدل تبخیر و تعرق را کمتر از مقدار مشاهده شده (به جز تاریخ کاشت سی تیر و MAD = %۸۰) شبیه‌سازی می‌کند (جدول ۶). بر اساس شاخص توافق، ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال دقت مدل در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق (به جزء تاریخ کاشت اول تیر) خوب است. در تاریخ کاشت اول تیر هر چند شاخص توافق و ضریب تبیین (به ترتیب برابر ۹۱ و ۹۸ درصد) قابل قبول بود، ولی میانگین مربعات خطای نرمال و درصد تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده به ترتیب معادل ۵۲/۱ و ۶۷/۳ درصد به دست آمد و شبیه‌سازی از دقت لازم برخوردار نبود (جدول ۶). نتایج نشان داد که بر اساس شاخص‌های کارکرد مدل، دقت مدل در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق تحت تأثیر تیمارهای کم‌آبیاری خوب است، ولی مقدار تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده در تیمارهای MAD = 40% و MAD = 60% و در تیمار تنش کامل آبیاری بیشتر از مقدار مشاهده شده بود (جدول ۶). در شرایط کم‌آبیاری مدل، سطح برگ را کمتر و میزان تبخیر و تعرق را بیشتر از مقدار مشاهده شده شبیه‌سازی می‌کند. این دو در تضاد با یک‌دیگر هستند، زیرا همگام با کاهش سطح برگ، فتوسنتز نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان تبخیر و تعرق به جای افزایش (که مدل پیش‌بینی می‌کند)، باید کاهش یابد. این امر نشان می‌دهد که مدل در شرایط کم‌آبیاری باید ارتقاء داده شود. دی‌جونگ و همکاران (DeJonge *et al.,* 2011) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. دی‌جونگ و همکاران (DeJonge *et al.,* 2011) گزارش دادند که عدم توجه به دمای برگ و مقاومت روزنه‌ای در تیمارهای در تنش از دلایلی هستند که باعث کاهش دقت مدل در شبیه‌سازی میزان تبخیر و تعرق می‌شود. همچنین برخی از محققان (Dokoohaki *et al.,* 2012؛ Faria and Boven, 2003) سعی کردند با تغییر

ساختار و الگوریتم به کار رفته شبیه‌سازی محصول نهایی گیاه در تیمارهای تحت تنش خشکی را تا حدودی بهبود دهند. دوکوهکی و همکاران (Dokoohaki *et al.,* 2012) گزارش دادند که بسته نرم‌افزاری DSSAT در تخمین میزان تبخیر از سطح خاک با مشکل روبه رو است. نیلسون و همکاران (Nielson *et al.,* 2002) نیز بیان داشتند که منشأ این مشکل را می‌توان در تخمین نادرست میزان تبخیر و تعرق و یا در روش نادرست جداسازی تبخیر و تعرق از یک‌دیگر در رابطه پریستلی تیلور دانست.

در مجموع، ارزیابی مدل IXIM نشان داد که این مدل مراحل فنولوژیکی (روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی) را در تاریخ کاشت‌های مختلف با دقت خوبی شبیه‌سازی می‌کند. که نشان‌دهنده ساختار مناسب مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی تحت تأثیر تاریخ کاشت‌های مختلف است. همچنین نتایج نشان داد که شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی تحت تأثیر محتوای رطوبتی خاک قرار نگرفت و از طرفی چون تولید و توزیع ماده خشک تا حد زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی است، لازم است تا در فرآیندهای به کار رفته در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی (در تیمارهای تنش خشکی) تجدید نظر شود. نتایج ارزیابی مدل در تاریخ کاشت‌های مختلف و رژیم‌های آبیاری متفاوت (به جز تنش کامل آبیاری) نیز نشان داد که شبیه‌سازی عملکرد ماده خشک و عملکرد دانه از دقت کافی برخوردار است، ولی در شرایط کم‌آبیاری مدل، حداکثر شاخص سطح برگ را کمتر و میزان تبخیر و تعرق را بیشتر از مقدار مشاهده شده شبیه‌سازی می‌کند. این امر نشان می‌دهد که مدل در شرایط کم‌آبیاری باید ارتقاء داده شود. نتایج نشان داد که افزودن دو ضریب ژنتیکی در مدل IXIM (سطح برگ بزرگ‌ترین برگ و طول عمر بزرگ ترین برگ) که شاخص سطح برگ را شبیه‌سازی می‌کند باعث شد تا شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ تا حدودی نسبت به مدل CERES- Maize بهتر شود ولی هنوز تا نقطه مطلوب (مخصوصاً در تیمارهای کم‌آبیاری) فاصله زیادی دارد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان از مدل IXIM در پیش‌بینی عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک در تاریخ کاشت‌های مختلف و رژیم‌های آبیاری متفاوت، در شرایط آب و هوایی گرگان بهره برد.

References

Alizadeh, O., Majede, E., Nadian, H. A., Normohamade, Gh., and Amerian, M. R. 2008. Effect of water stress and different nitrogen rates on phenology, growth and development of corn. Bimonthly Journal of Agricultural Sciences and Resources 14: 101-115 (in Persian).

Andarzian, B., Bakhshandeh, A. M., Bannayan, M., and Emam, Y. 2007. Evaluation of the CERES-wheat model in Ahvaz condition. Iranian Journal of Field Crops Research 6: 11-22 (in Persian).

Anonymous 1989. SAS/STAT User's Guide, Release 6.09. SAS Inst., Inc., Cary, NC.

Anonymous 2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) [Online] http://www.icasa.net/dssat/index.html (cited 2014 Oct. 2).

Bannayan, M., Hoogenboom, G., and Crout, N. M. J. 2004. Photothermal impact on maize performance: a simulation approach. Ecological Modelling 180: 277-290.

Boedhram, N. 1998. Seasonal changes of leaf area distribution and light response curves, and incorporation of vapor pressure deficit into a canopy photosynthesis model in corn. Publication of University of Nebraska, Lincoln, USA.

DeJonge, K. 2011. Evaluation and improvement of CERES-Maize Evapotranspiration simulations under full and limited irrigation treatments in northern Colorado. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, Colorado, USA.

Dogan, E., Clark, G. A., Rogers, D. H., Martin, V., and Vanderlip, R. L. 2006. On-farm scheduling studies and CERES-Maize simulation of irrigated corn. Applied Engineering in Agriculture 22(4): 509-516.

Dokoohaki, H., Gheysari, M., Mousavi, S. F., and Mirlatifi, S. M. 2012. Estimation soil water content under deficit irrigation by using DSSAT. Agricultural Water Management 2: 1-14.

Eck, H.V. 1984. Irrigated corn yield response to nitrogen and water. Agronomy Journal 76: 421-428.

Faria, R. T. D., and Bowen, W. T. 2003. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. Brazilian Archives of Biology and Tecnology 46: 489-498.

Gheysari, M., Mirlatifi, S. M., Homaee, M., Asadi, M. E., and Hogenboom, G. 2009. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates, Agricultural Water Managment 96: 964- 954.

Gungula, D. T., Kling, J. G., and Togun, A. O. 2003. CERES-Maize predictions of maize phenology under nitrogen-stressed condition in nigeria. Agronomy Journal 95: 892-899.

Hoogenboom, G., A. Jintrawet., and Wilkens, P. W. 2009. A training program on DSSAT version 4.5: Assessing crop production, nutrient management, climatic risk and environmental sustainability with simulation models., In N. U. O. Malaysia, (ed.), March 30 -April 10. Bangi, Selangor, Malaysia.

Hoogenboom, G., J. W. Jones, C. H. Porter, P. W. Wilkens, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, and Tsuji, G. Y. 2003. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Vol. 1. University of Hawaii, Honolulu, HI, USA.

Irmak, A., Jones, J. W., Mavromatis, T., Welch, S. M., Boote, K. J., and Wilkerson, G.G. 2000. Evaluating methods for simulating soybean cultivar responses using cross validation. Agronomy Journal 92: 1140-1149.

Jamieson, P., Porter, J., and Wilson, D. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research 27: 337-350.

Jibrin, M., Jibrin, A., Kamara, Y., and Friday, E. 2012. Simulating planting date and cultivar effects on dryland maize production using CERES-maize model. African Journal of Agricultural Research 7(40): 5530-5536.

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., and Ritchie, J. T. 2003. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy 18: 235–265.

Kamkar, B., Koochki, A. R., Mahallati, M. N., and Razvani- Moghaddam, P. R. 2006. Yield gap analysis of cumin in nine regions of Khorasan provinces using modelling approach. Iranian Journal of Field Crops Research 2(2): 196-208 (in Persian).

Kamkar, B., Koocheki, A. R., Mahallati, M. N., and Razvani- Moghaddam, P. R. 2008. Construction and primary evaluation of a simple model to predict potential dry matter production in pearl millet. Electronic Journal of Crop Production 3: 99-

116 (in Persian).

Khaliq, T., 2008. Modeiling the impact of climate change on (*Zea mays L.*) productivity in the Panjab. Ph.D. Thesis, University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan.197 pp.

Lizaso, J., Batchelor, W., and Adams, S. 2001. Alternate approach to improve kernel number calculation in CERES-Maize. Transactions of the ASAE. 44: 1011-1018.

Lizaso, J., Batchelor, W., Boote, K., and Westgate, M. 2005a. Development of a leaf-level canopy assimilation model for CERES-Maize. Agronomy Journal 97: 722-733.

Lizaso, J., Batchelor, W., Boote, K., Westgate, M., Rochette, P., and Moreno-Sotomayor, M. 2005b. Evaluating a leaf-level canopy assimilation model linked to CERES-Maize. Agronomy Journal 97: 734-740.

Lizaso, J., Batchelor, W., and Westgate, M. 2003a. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. Field Crops Research 80: 1-17.

Lizaso, J., Westgate, M., Batchelor, W., and Fonseca, A. 2003b. Predicting potential kernel set in maize from simple flowering characteristics. Crop Science 43: 892. 1005.

Lizaso, J., Boote, K. J., Jones, J. W., and Porter, C. H. 2008. IXIM: A new maize simulation model for DSSAT v4. 5. 10th Congreso de la Sociedad Europea de Agronomia, 15-19 Sep., Bolonia, Italia.

Loague, K., and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. Contaminant Hydrology Journal 7: 51-73.

Loomis, R., and Amthor, J. 1999. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. Crop Science 39: 1584-1596.

Mahru- Kashani, A. H., Soltani, A., Galeshi, S., and Kalate-Arabi, M. 2010. Estimates of genetic coefficients and evaluation of model DSSAT for Golestan province. Electronic Journal of Crop Production 3 (2): 229-253 (in Persian).

Mavromatis, T., Boote, K. J., Jones, J. W., Wilkerson, G. G., and Hoogenboom, G.

2002. Repeatability of model genetic coefficients derived from soybean performance trials across different states. Crop Science 42: 76–89.

Mokhtarpour, H. 2011. Impact of planting date and density on growth of maize in northeren Iran. Ph.D. Thesis, University of Putra, Putra, Malysia.

Nielsen, D. C., Ma, L., Ahuja, L. R., and Hoogenboom, G. 2002. Simulating soybean water stress effects with RZWQM and CROPGRO models. Agronomy Journal 94: 1234-1243.

Rochette, P., Desjardins, R. L., Pattey, E., and Lessard, R. 1996. Instantaneous measurement of radiation and water use efficiencies of a maize crop. Agronomy Journal 88: 627-635.

Saseendran, S. A., Ma, L., Nielsen, D. C., Vigil, M. F., and Ahuja, L. R. 2005. Simulating planting date effects on corn production using RZWQM and CERES-Maize models. Agronomy Journal 97: 58-71.

Sohrabi, B., and Ghorbani, N. 2002. The effect of soil moisture allowed depletion on cotton yield in Gorgan. Bimonthly Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 9: 100-108 (in Persian).

Soltani, A. 2007. Application of SAS in Statistical Analysis. JDM Press, Mashhad, Iran.182pp. (in Persian).

Soltani, A. 2008. Mathematical Modeling in Field Crops. Ferdowsi University Press. Mashhad, Iran. 175 pp. (in Persian).

Soltani, A., Robertson, M. J., Mohammad-Nejad, Y., and Rahemi-Karizaki, A. 2008. Modeling leaf production and senescence in chickpea. In: International Meeting on Soil Fertility and Management and Agroclimatology. pp. 655-674. Turkey.

Tollenaar, M., and Hunter, R. 1983. A photoperiod and temperature sensitive period for leaf number of maize. Crop Scince 23: 457-460.

Westgate, M.E., Forcella, F., Reicosky, D.C., and Somsen, J. 1997. Rapid canopy closure for maize production in the northern US Corn Belt: Radiation-use efficiency and grain yield. Field Crops Research 49: 249-258.

Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of the American Meteorological Society 63: 1309-1313.

Yazar, A., Sezen, S. M., and Gencel, B., 2002. Drip irrigation of corn in the Southeast Anatolia Project (GAP) area in Turkey. Irrigation and Drainge 51: 293-300.